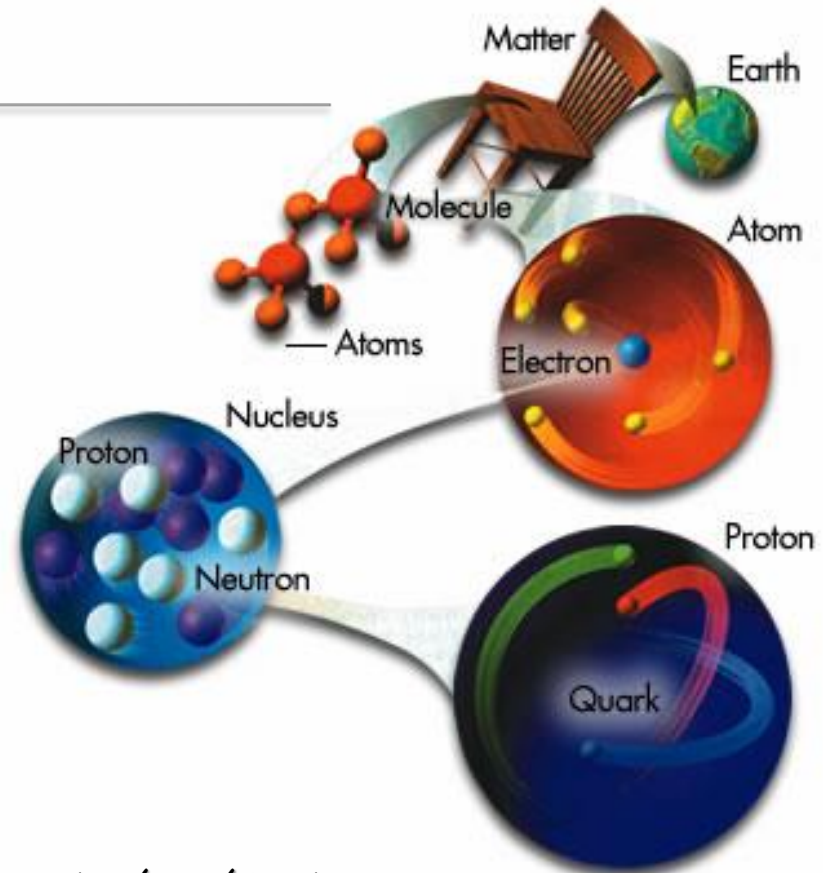


Un mondo di particelle e nuclei da esplorare con... Costanza e un pizzico di charm

“Indubbiamente i filosofi hanno ragione, quando ci dicono che nulla è grande o piccolo in sé, ma solo comparativamente. Forse il caso farà trovare ai Lillipuziani qualche contrada abitata da esseri tanto minuscoli rispetto a loro, quanto lo erano essi rispetto a me; e chi sa che anche questa colossale razza di mortali non possa essere superata a sua volta, in qualche remota parte del globo non ancora scoperta?”
J. Swift, *I viaggi di Gulliver*



Dall'antichità a oggi...

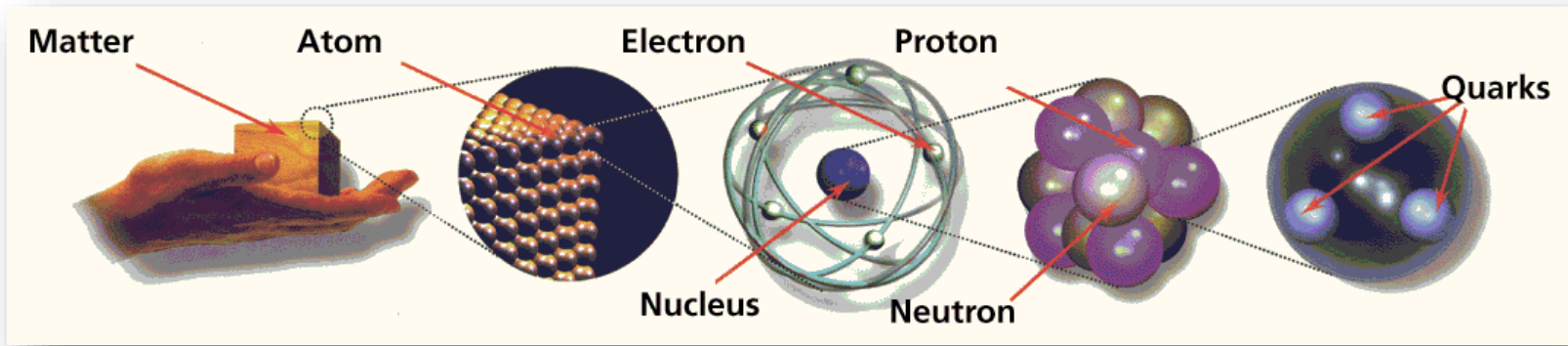
- Quali sono i costituenti fondamentali della materia?
 - Con quali forze interagiscono?
 - Qual è l'origine di queste forze?



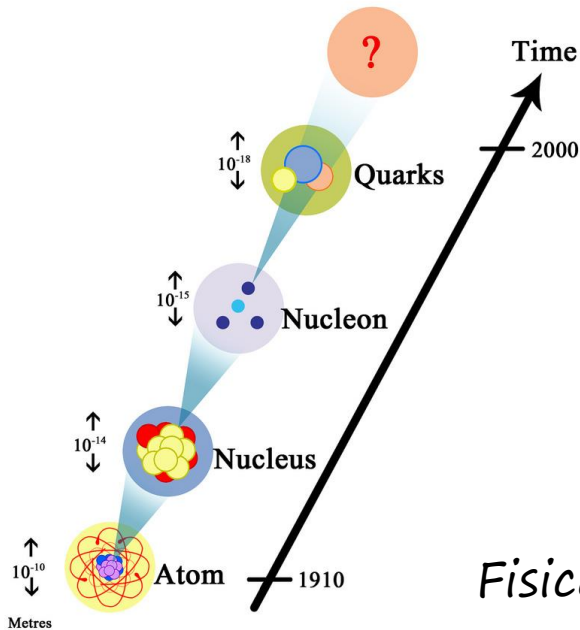
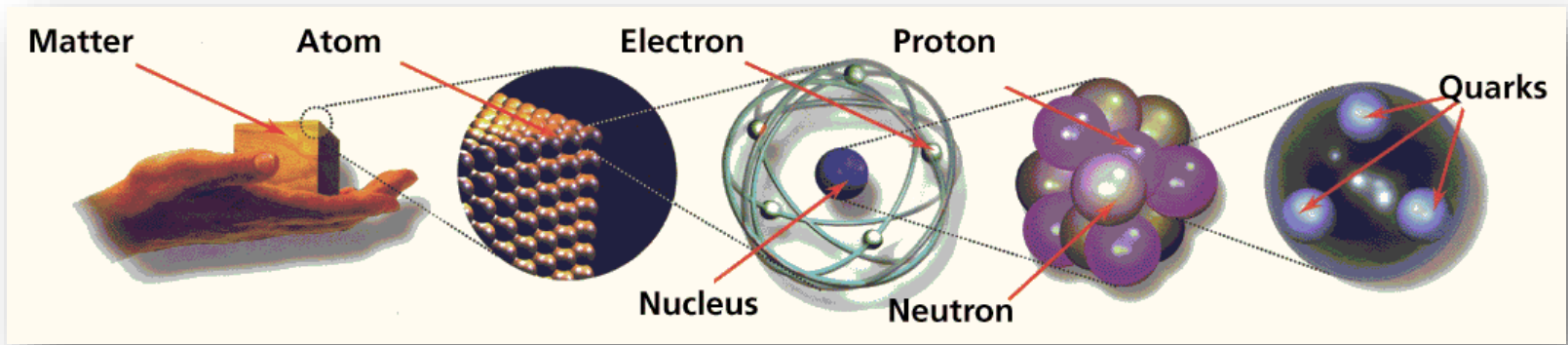
Democrito
(460 a.C. – 370 a.C)

Interpretare **fenomeni complessi**
in termini delle proprietà delle
parti più semplici che li
compongono e delle forze che
intervengono a comporli

Il concetto di «elementare»

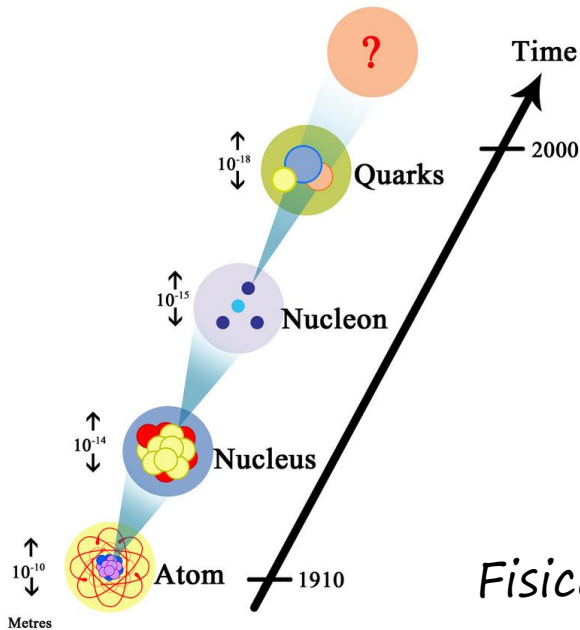
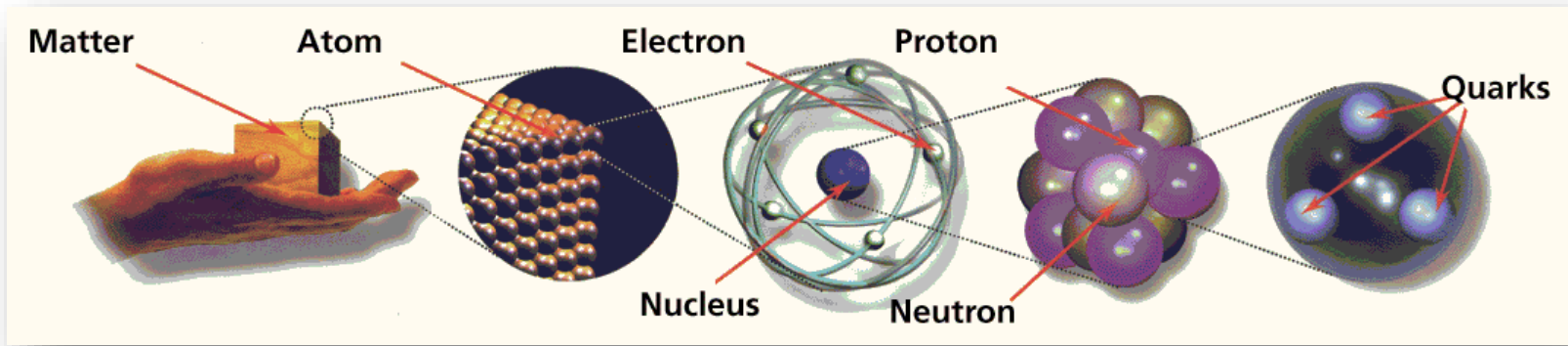


Il concetto di «elementare»



*Fisica atomica, inizio 1900:
atomo ($r \sim 10^{-10}$ m)*

Il concetto di «elementare»

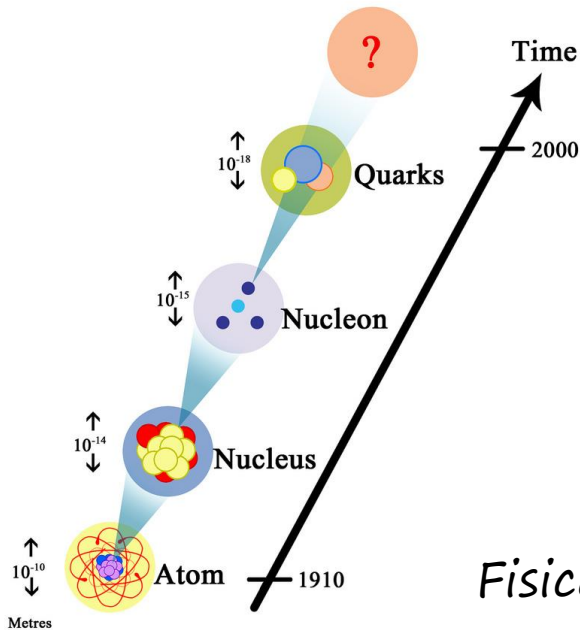
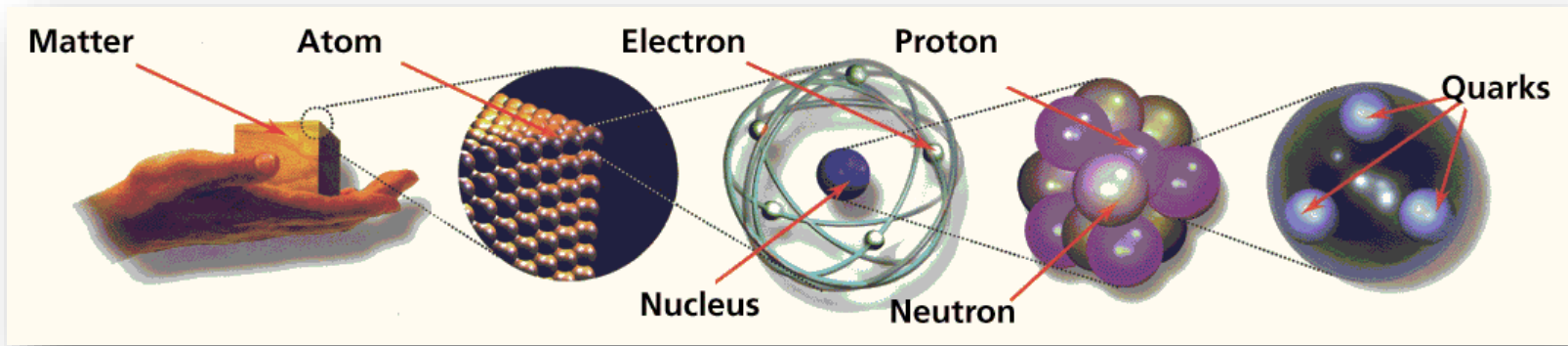


Fisica nucleare, 1930:

- nucleo ($r \sim 10^{-14}$ m)
- nucleone ($r \sim 10^{-15}$ m)

Fisica atomica, inizio 1900:
atomo ($r \sim 10^{-10}$ m)

Il concetto di «elementare»



Fisica delle particelle, oggi:

- quarks (???)
- leptoni (elettrone $r \sim 10^{-18}$ m)

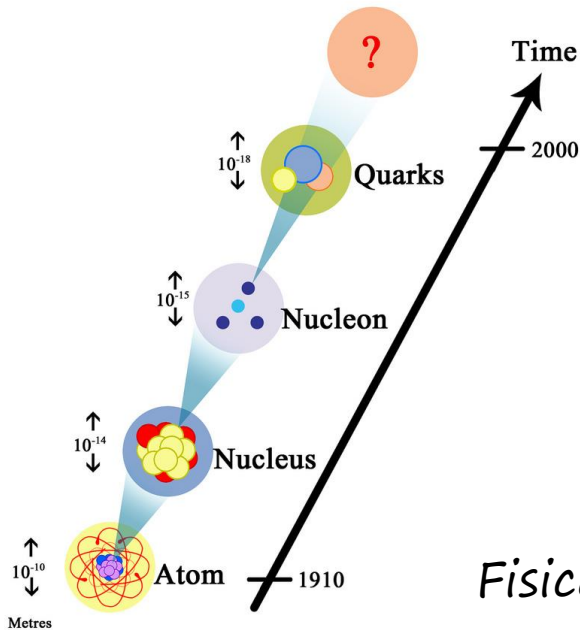
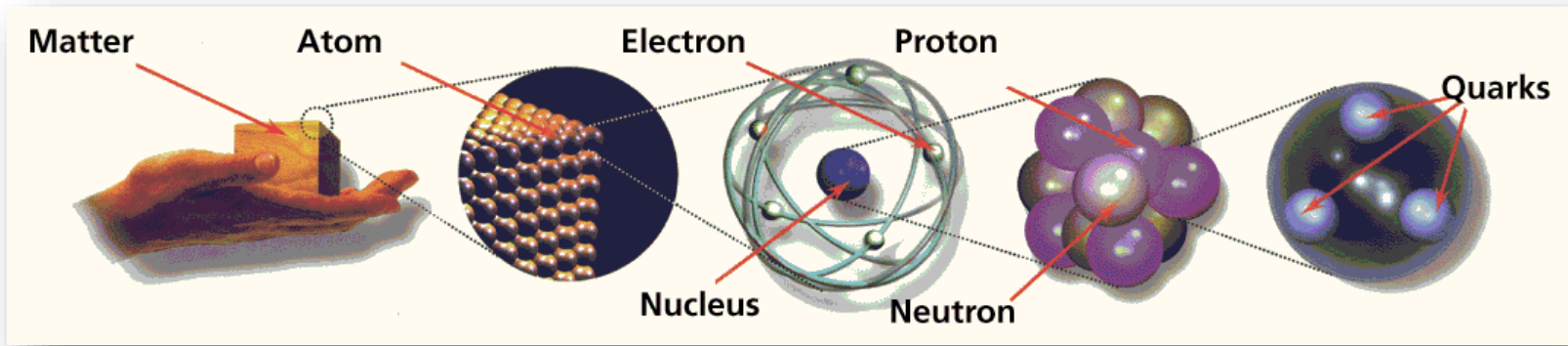
Fisica nucleare, 1930:

- nucleo ($r \sim 10^{-14}$ m)
- nucleone ($r \sim 10^{-15}$ m)

Fisica atomica, inizio 1900:

atomo ($r \sim 10^{-10}$ m)

Il concetto di «elementare»



... e poi??

Fisica delle particelle, oggi:

- quarks (???)
- leptoni (elettrone $r \sim 10^{-18}$ m)

Fisica nucleare, 1930:

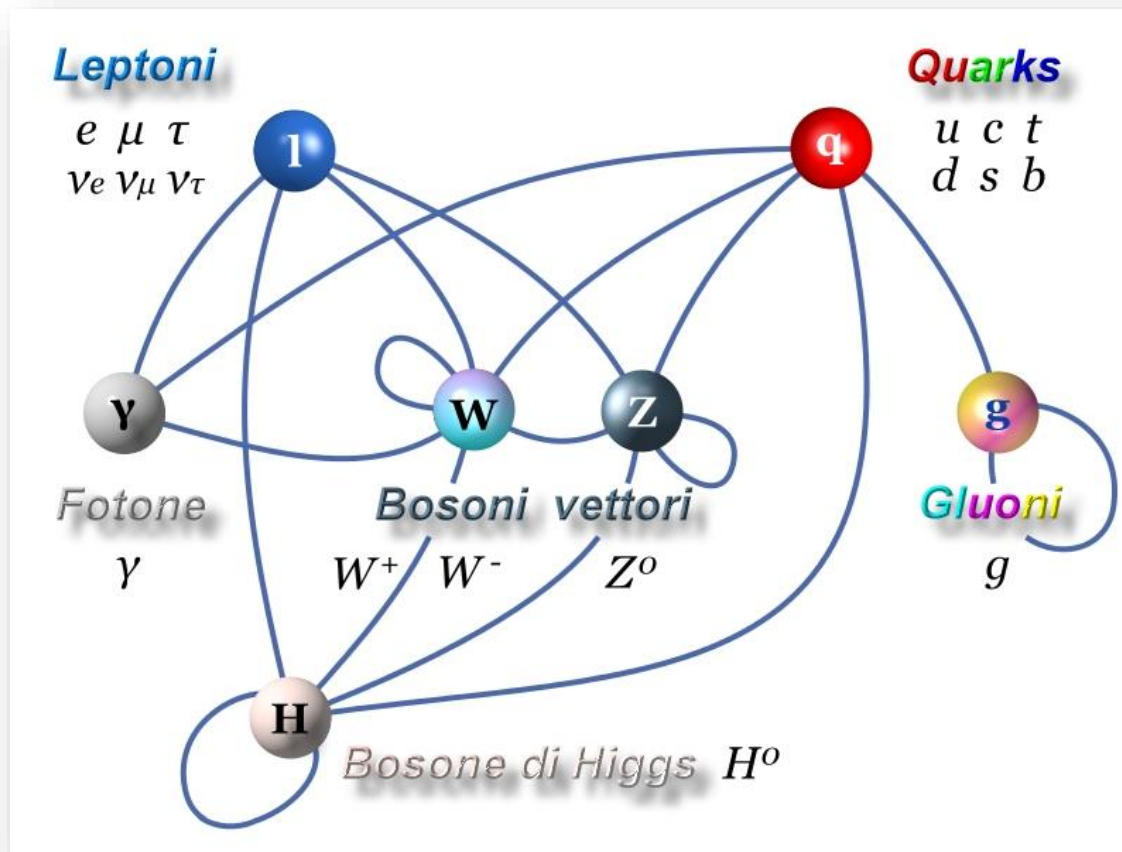
- nucleo ($r \sim 10^{-14}$ m)
- nucleone ($r \sim 10^{-15}$ m)

Fisica atomica, inizio 1900:

atomo ($r \sim 10^{-10}$ m)

Il Modello Standard

È la teoria che descrive efficacemente centinaia di particelle e interazioni complesse attraverso «poche» particelle elementari e interazioni fondamentali



Il Modello Standard

È la teoria che descrive efficacemente centinaia di particelle e interazioni complesse attraverso «poche» particelle elementari e interazioni fondamentali

FERMIONS			matter constituents spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...		
Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_L lightest neutrino*	$(0-0.13)\times 10^{-9}$	0	u up	0.002	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.005	-1/3
ν_M middle neutrino*	$(0.009-0.13)\times 10^{-9}$	0	c charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
ν_H heaviest neutrino*	$(0.04-0.14)\times 10^{-9}$	0	t top	173	2/3
τ tau	1.777	-1	b bottom	4.2	-1/3

Il Modello Standard

È la teoria che descrive efficacemente centinaia di particelle e interazioni complesse attraverso «poche» particelle elementari e interazioni fondamentali

Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0	g gluon	0	0
W^-	80.39	-1			
W^+ W bosons	80.39	+1			
Z^0 Z boson	91.188	0			

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

Perché studiare ancora??

Non abbiamo ancora capito tutto!!!

- Conosciamo con precisione sufficiente le **proprietà dei nucleoni**? (massa, carica, vita media, spin, «dinamica interna»)?
- **Proton spin puzzle**
- «**Missing resonances**»: la teoria prevede l'esistenza di risonanze del nucleone non ancora osservate – dove sono??
- Non solo nucleoni: e gli stati del **charmonio** o gli **esotici** previsti dalla teoria e non ancora osservati??
- Perché ci sono 3 generazioni di particelle? Sono davvero 3?
- Qual è l'origine della massa delle particelle?
- I **neutrini** sono davvero privi di massa? O «oscillano»?
- Perché c'è asimmetria **materia – antimateria** nell'Universo?
- **Gravità** nel Modello Standard?
- Esistono evidenze di **nuova fisica** oltre il Modello Standard?



Perché studiare ancora??

Non abbiamo ancora capito tutto!!!

- Conosciamo con precisione sufficiente le **proprietà dei nucleoni**? (massa, carica, vita media, spin, «dinamica interna»)?
- **Proton spin puzzle**
- «**Missing resonances**»: la teoria prevede l'esistenza di risonanze del nucleone non ancora osservate – dove sono??
- Non solo nucleoni: e gli stati del **charmonio** o gli **esotici** previsti dalla teoria e non ancora osservati??
- Perché ci sono 3 generazioni di particelle? Sono davvero 3?
- Qual è l'origine della massa delle particelle?
- I **neutrini** sono davvero privi di massa? O «oscillano»?
- Perché c'è **asimmetria materia – antimateria** nell'Universo?
- **Gravità** nel Modello Standard?
- Esistono evidenze di **nuova fisica** oltre il Modello Standard?



L'esperimento MAMBO

A2 @ MAMI
(Mainz)

MAMi-Bonn

B1 BGO-OD @
ELSA (Bonn)

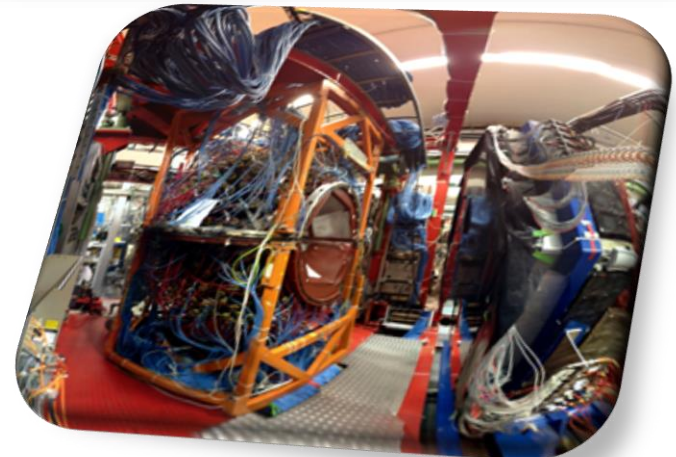
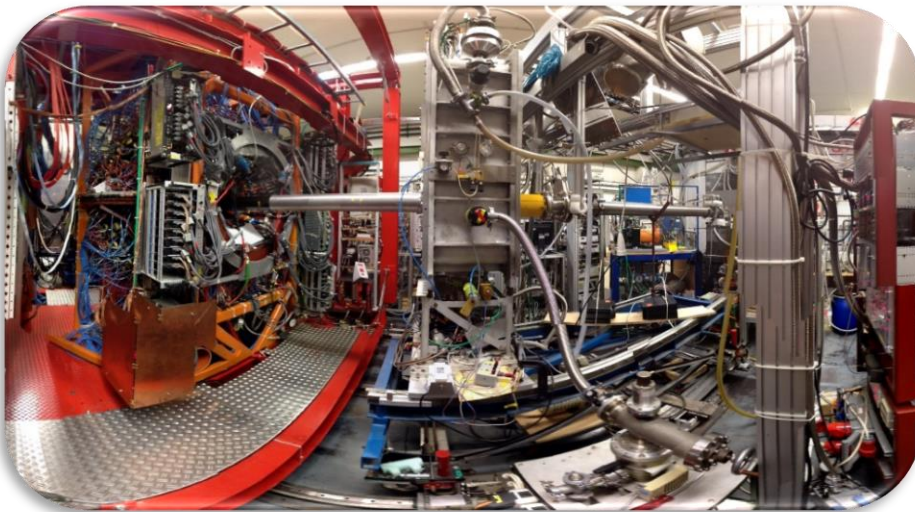
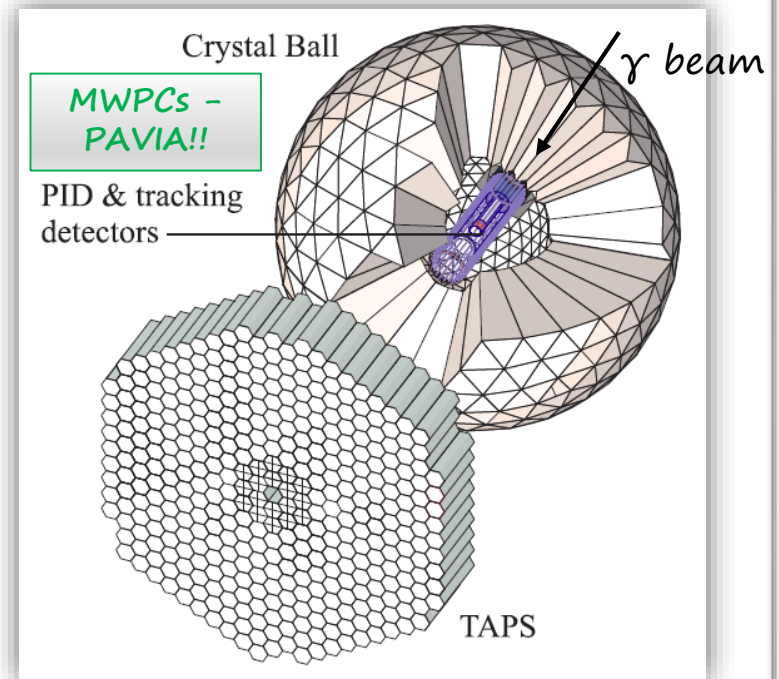
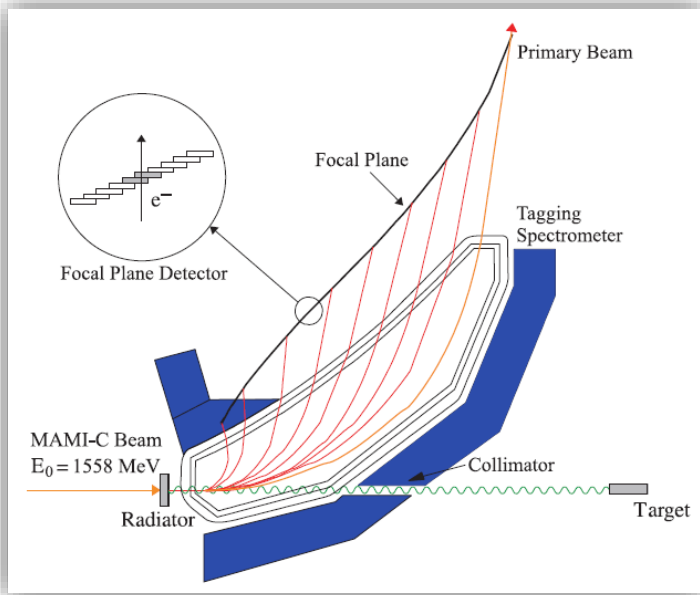
Goal di MAMBO:

- **Studiare le proprietà fondamentali di protone/neutrone e dei loro stati risonanti** (informazioni necessarie per risolvere il problema dello **spin**)
- **Verificare i principi quantistici fondamentali** (conservazione carica, CP, ...) attraverso lo studio dei decadimenti rari dei mesoni η ed η'
- Studiare le modifiche delle **proprietà fondamentali del protone/neutrone all'interno dei nuclei atomici** («neutron skin»)



- Si utilizzano **fasci di fotoni** prodotti per bremsstrahlung presso gli acceleratori MAMI @ Mainz ($E_\gamma < 1.5$ GeV) ed ELSA @ Bonn ($E_\gamma < 3$ GeV)
 - Misure con basse sezioni d'urto e/o di precisione

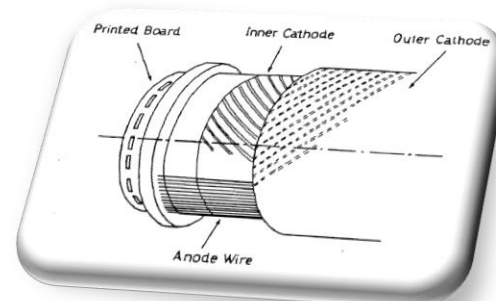
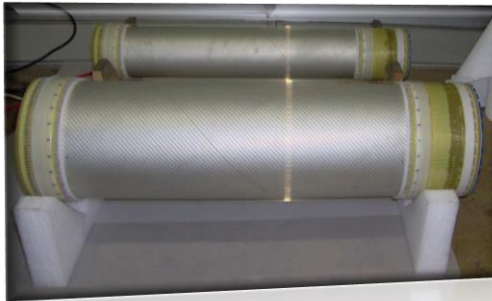
L'esperimento MAMBO - A2 @ MAMI (Mainz)



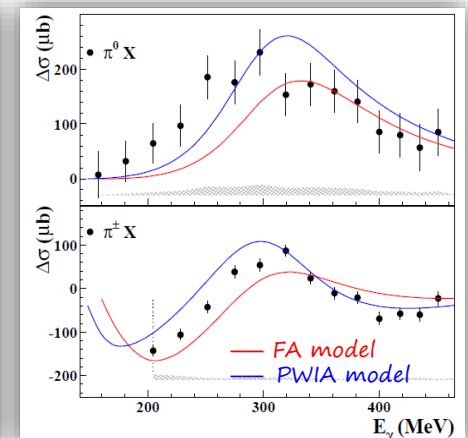
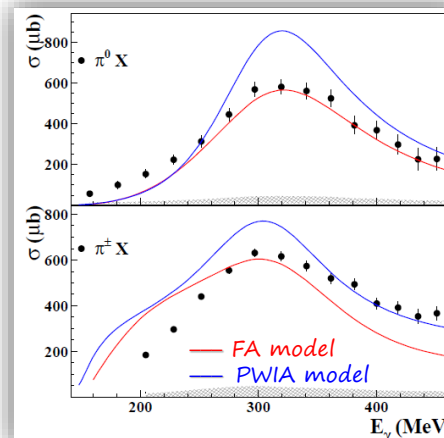
L'esperimento MAMBO

Attività del gruppo di Pavia:

- Costruzione, test, commissioning e manutenzione delle **camere a fili cilindriche** (MWPCs) usate sia a Mainz sia a Bonn per il tracciamento delle particelle cariche emesse nelle reazioni indotte dai fotoni



- Coordinamento del programma di fisica che utilizza fasci di fotoni linearmente polarizzati e bersagli di protoni/neutroni polarizzati
- **Analisi offline** dei dati raccolti
- Partecipazione alla **presa dati**



Perché studiare ancora??

Non abbiamo ancora capito tutto!!!

- Conosciamo con precisione sufficiente le proprietà dei nucleoni? (massa, carica, vita media, spin, «dinamica interna»)?
- Proton spin puzzle
- «Missing resonances»: la teoria prevede l'esistenza di risonanze del nucleone non ancora osservate – dove sono??
- Non solo nucleoni: e gli stati del **charmonio** o gli **esotici** previsti dalla teoria e non ancora osservati??
- Perché ci sono 3 generazioni di particelle? Sono davvero 3?
- Qual è l'origine della massa delle particelle?
- I **neutrini** sono davvero privi di massa? O «oscillano»?
- Perché c'è asimmetria **materia – antimateria** nell'Universo?
- **Gravità** nel Modello Standard?
- Esistono evidenze di **nuova fisica** oltre il Modello Standard?



L'esperimento



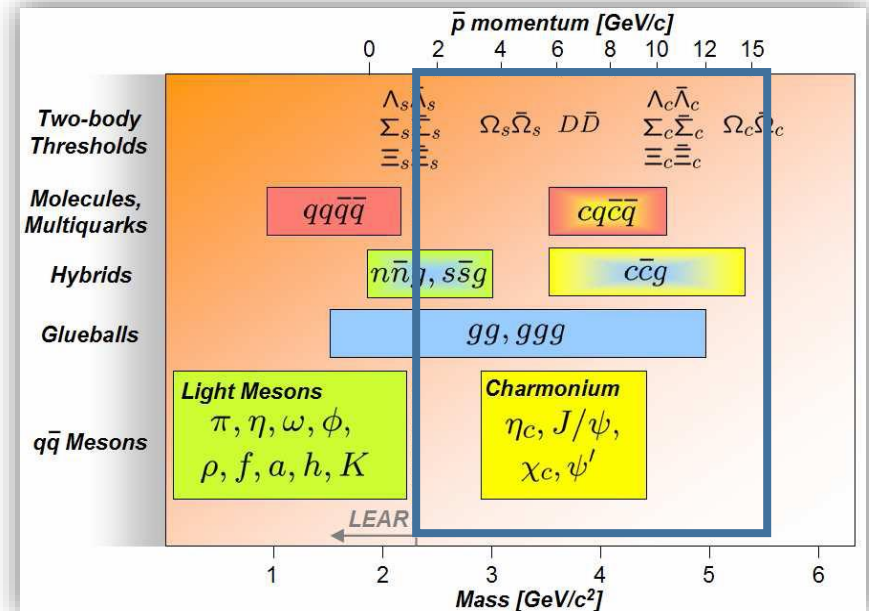
antiProton ANnihilation at DArmstadt



Sarà costruito presso la facility FAIR a Darmstadt (Germania) per studiare questioni fondamentali di fisica adronica e nucleare attraverso le interazioni di antiprotoni con bersagli fissi di protoni e nuclei
(momento antiprotoni: 1.5- 15 GeV/c,
energia c.m.: 2.25, 5.47 GeV/c²)

Goal di PANDA:

- **Spettroscopia adronica**
 - Misura delle proprietà degli adroni
 - Ricerca di particelle «esotiche»
- **Adroni nella materia**
- **Struttura dei nucleoni**
 - Generalised Parton Distributions
 - Fattori di forma del protone
 - Processi Drell-Yan
- **Ipernuclei**



L'esperimento



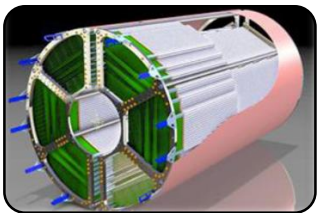
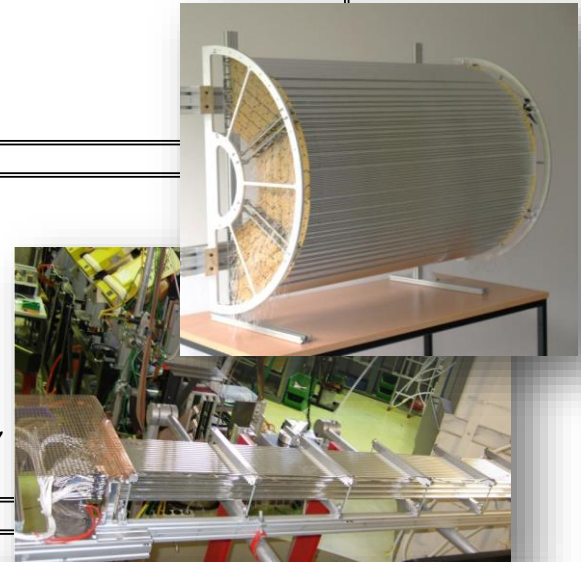
TEORIA:

- Sviluppo di generatori di eventi
- Studio di sezioni d'urto
- Analisi in onde parziali



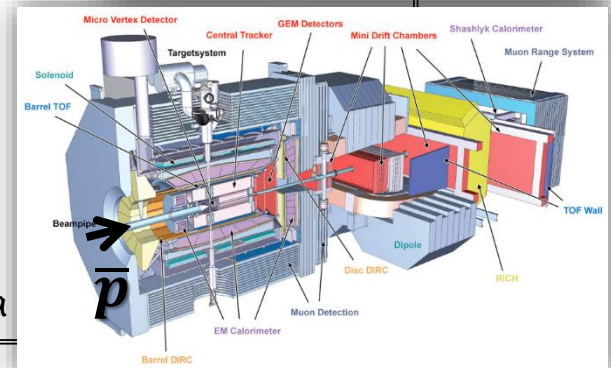
R&D:

- Costruzione del rivelatore
- Test su prototipi (@ Big Karl, Jülich)
- Sviluppo e test dell'elettronica di front-end



COMPUTING:

- Sviluppo del software
- Progettazione del rivelatore
- Strumenti per l'analisi dei dati
- Simulazione e analisi dei canali di fisica



L'esperimento



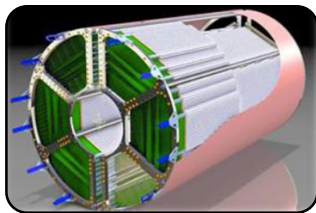
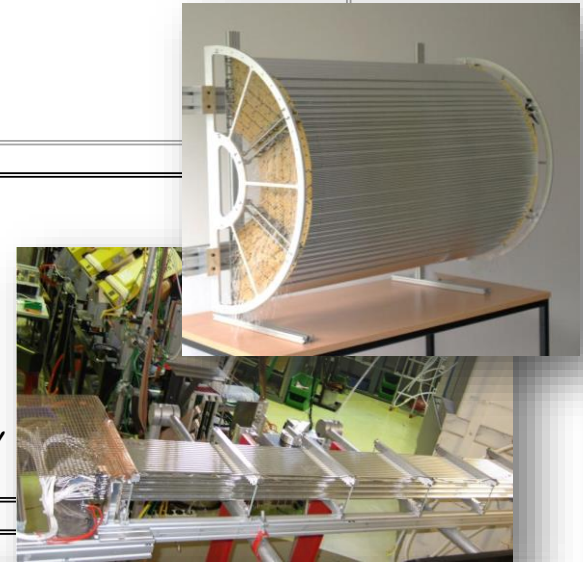
TEORIA:

- Sviluppo di generatori di eventi
- Studio di sezioni d'urto
- Analisi in onde parziali



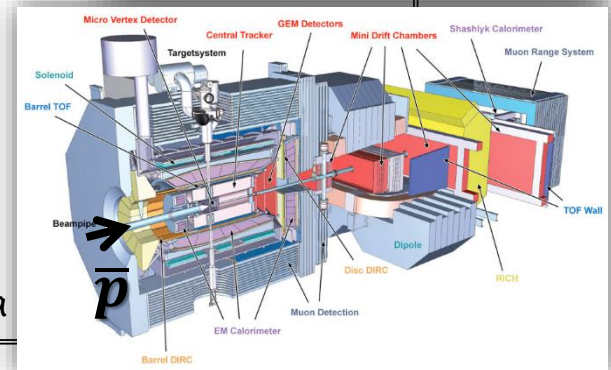
R&D:

- Costruzione del rivelatore
- Test su prototipi (@ Big Karl, Jülich)
- Sviluppo e test dell'elettronica di front-end



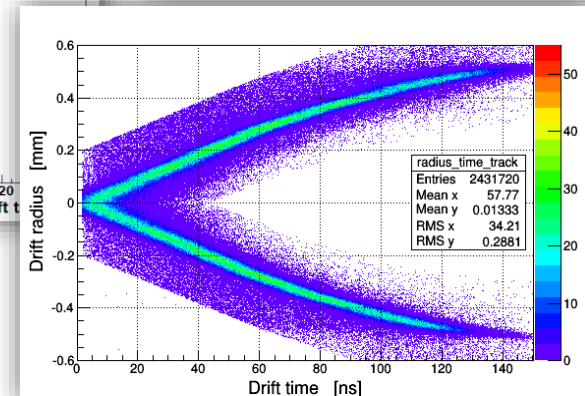
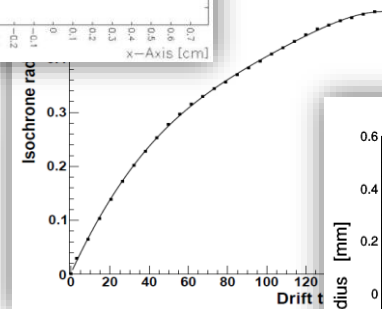
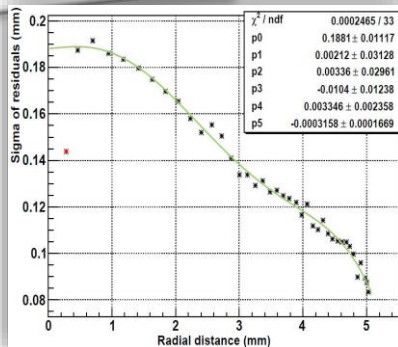
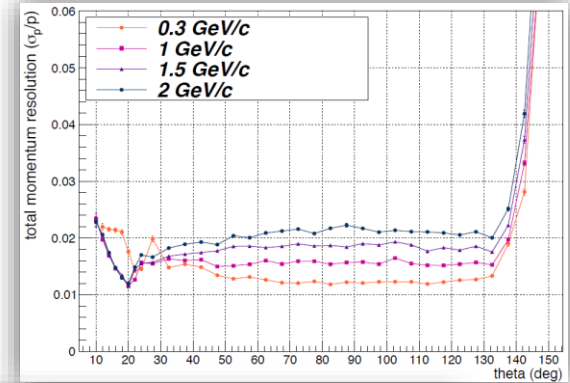
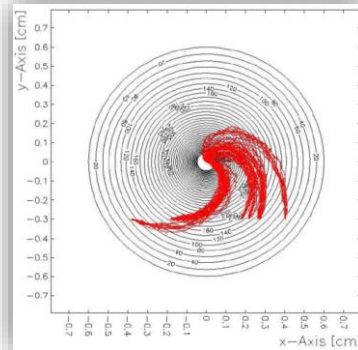
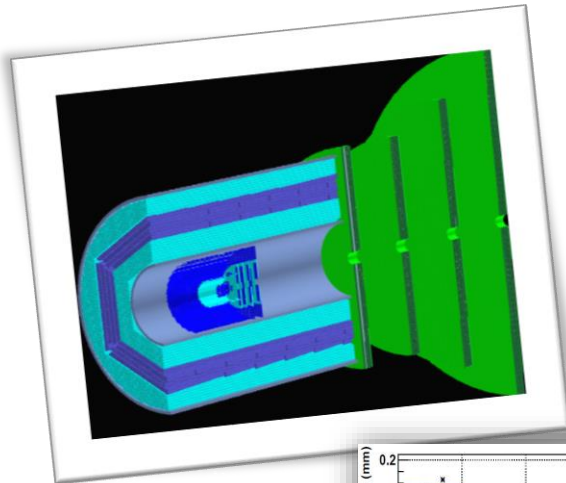
COMPUTING:

- Sviluppo del software
- Progettazione del rivelatore
- Strumenti per l'analisi dei dati
- Simulazione e analisi dei canali di fisica



L'esperimento

Il gruppo di Pavia si occupa dello sviluppo del **software di tracciamento** (pattern recognition, track fitting, Kalman filter) della parte centrale del rivelatore (**Straw Tube Tracker**)



...e dell'analisi dei **dati sperimentali** raccolti col prototipo di Straw Tube Tracker all'acceleratore Big Karl (Jülich) con fasci di protoni e deuterio

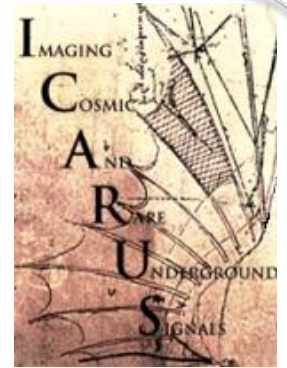
Perché studiare ancora??

Non abbiamo ancora capito tutto!!!

- Conosciamo con precisione sufficiente le proprietà dei nucleoni? (massa, carica, vita media, spin, «dinamica interna»)?
- Proton spin puzzle
- «Missing resonances»: la teoria prevede l'esistenza di risonanze del nucleone non ancora osservate – dove sono??
- Non solo nucleoni: e gli stati del **charmonio** o gli **esotici** previsti dalla teoria e non ancora osservati??
- Perché ci sono 3 generazioni di particelle? Sono davvero 3?
- Qual è l'origine della massa delle particelle?
- I **neutrini** sono davvero privi di massa? O «oscillano»?
- Perché c'è asimmetria **materia – antimateria** nell'Universo?
- **Gravità** nel Modello Standard?
- Esistono evidenze di **nuova fisica** oltre il Modello Standard?

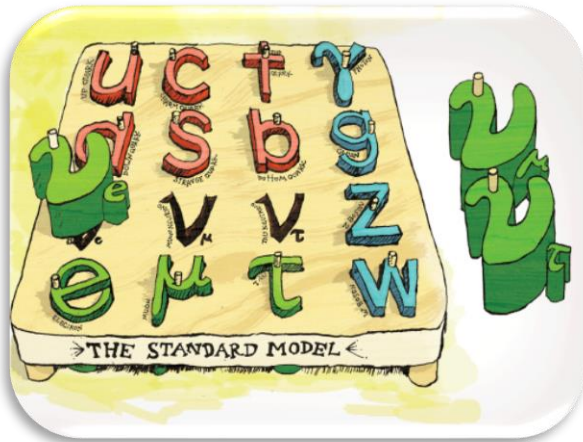


L'esperienza ICARUS



Imaging Cosmic And Rare Underground Signals

Modello standard ($m_\nu = 0$)



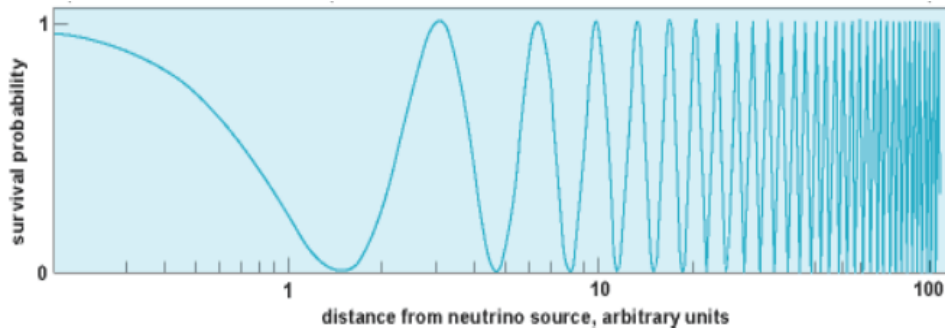
Neutrino mixing se i neutrini hanno massa

$$|v_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |v_i\rangle$$

$$i = 1, 2, 3$$

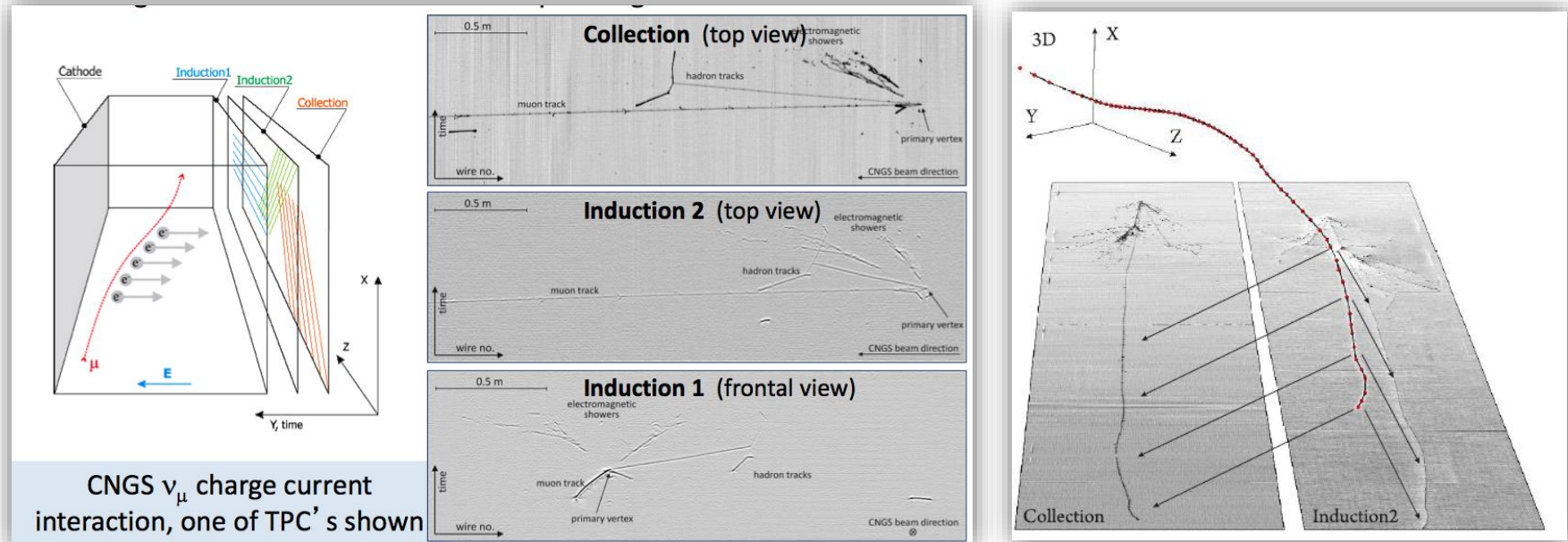
$$\alpha = e, \mu, \tau$$

$$P(v_\alpha \rightarrow v_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2(1.27 \Delta m^2 L / 2E)$$



L'esperimento ICARUS

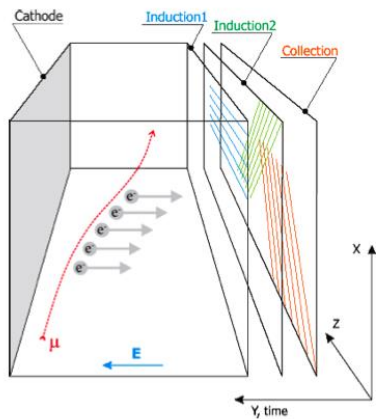
Camera a proiezione temporale in Argon liquido per la fisica delle oscillazioni di neutrino



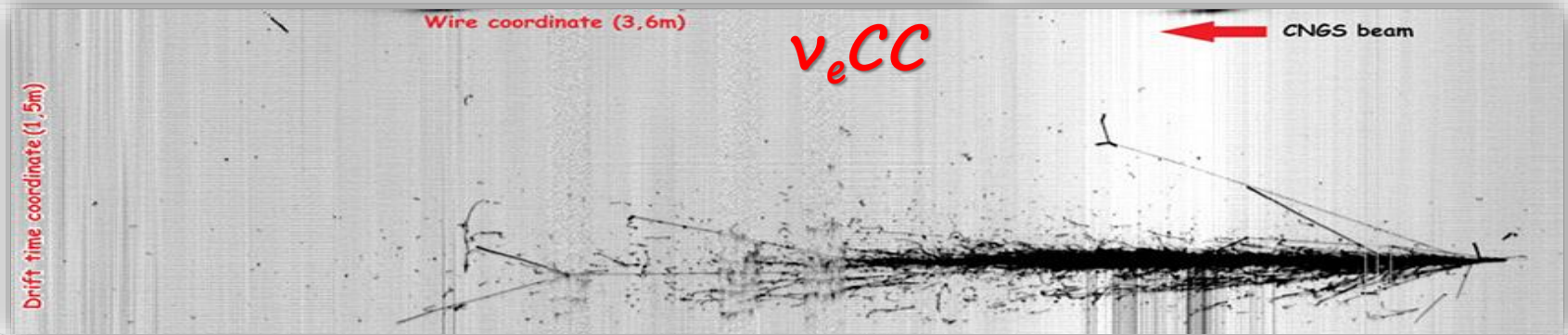
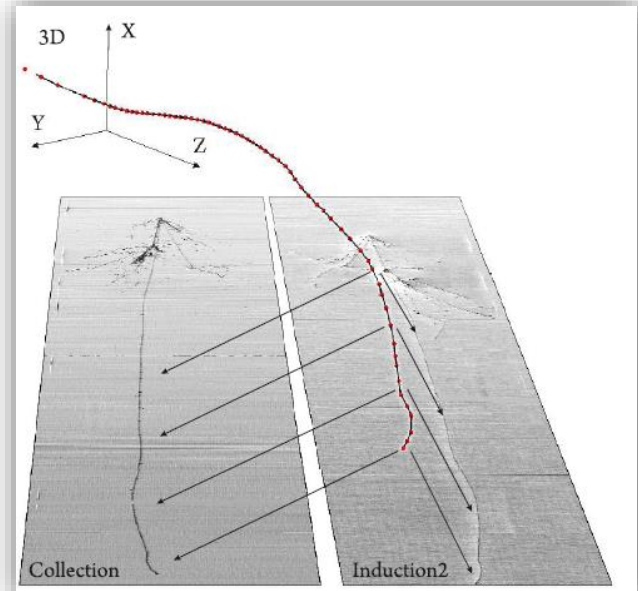
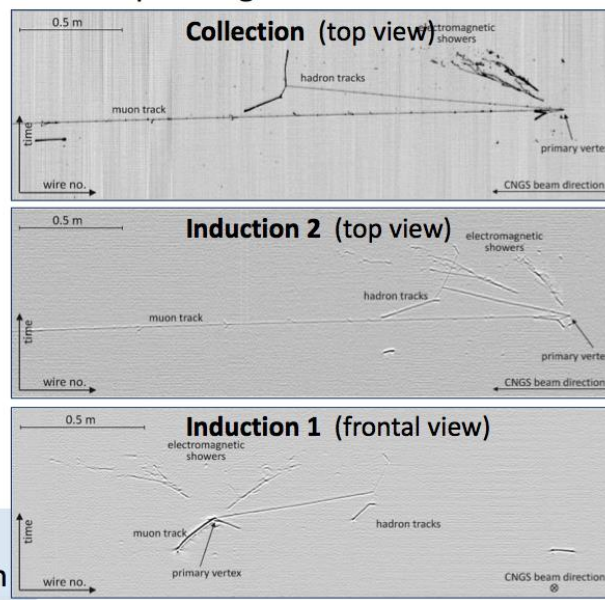
È una camera a bolle elettronica per la ricostruzione 3D degli eventi ionizzanti prodotti a seguito di interazioni di neutrini in Argon liquido: un campo elettrico accelera gli elettroni di ionizzazione verso un anodo di lettura composto da tre piani di fili, che permettono la ricostruzione bidimensionale della traccia. La terza dimensione viene estratta dal tempo di deriva degli elettroni all'anodo.

ICARUS

Camera a proiezione temporale in Argon liquido per la fisica delle oscillazioni di neutrino

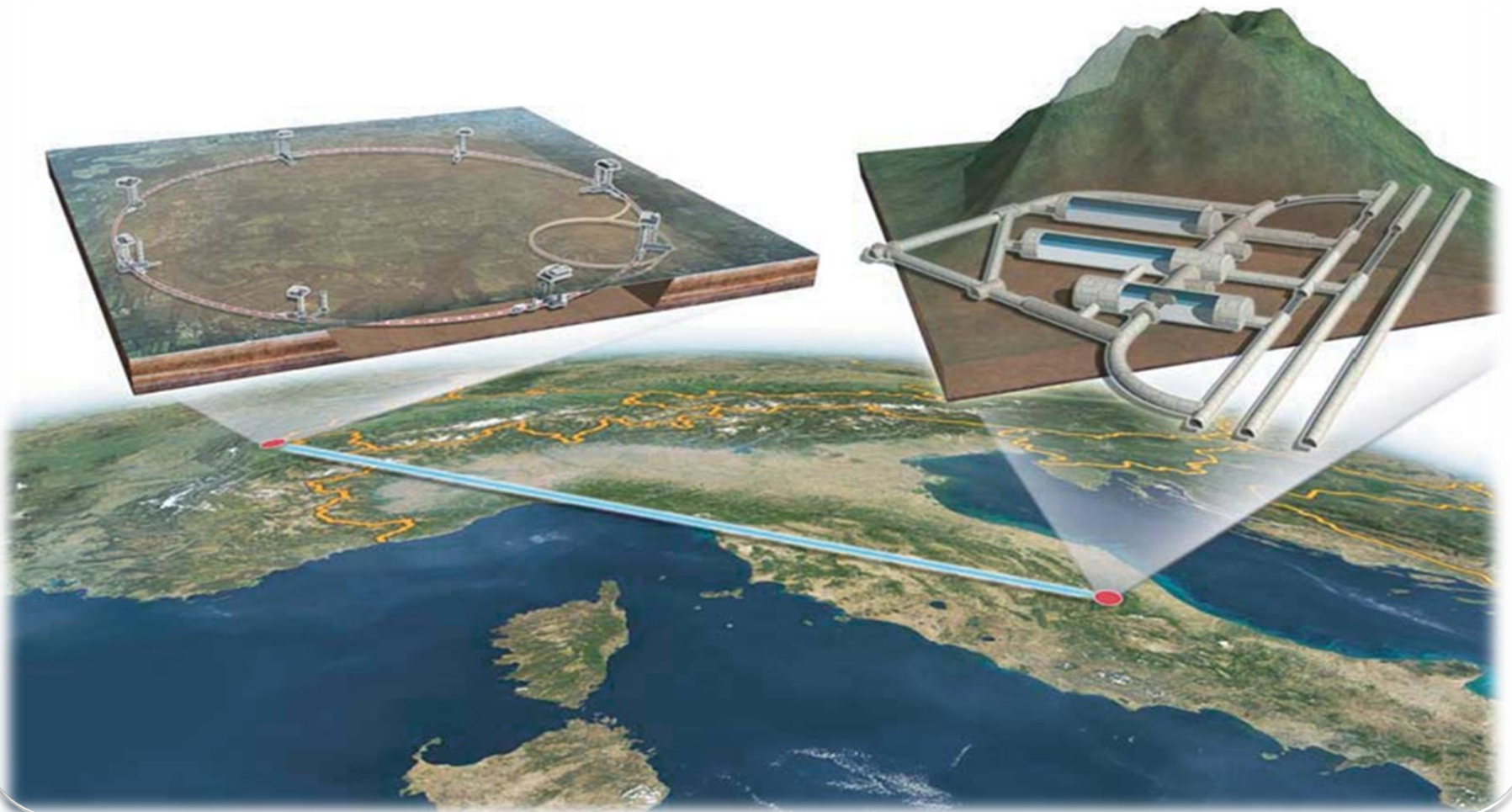


CNGS ν_μ charge current interaction, one of TPC's shown



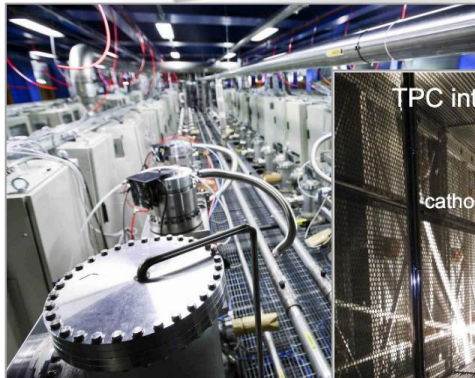
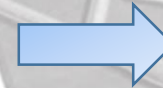
L'esperimento ICARUS

Il gruppo di Pavia ha contribuito alla costruzione e messa in funzione del rivelatore presso i Laboratori INFN del Gran Sasso, per la rivelazione dei neutrini del fascio CNGS dal CERN al Gran Sasso



L'esperimento ICARUS

Il gruppo di Pavia ha contribuito alla costruzione e messa in funzione del rivelatore presso i Laboratori INFN del Gran Sasso, per la rivelazione dei neutrini del fascio CNGS dal CERN al Gran Sasso



TPC internal structure

cathode

race tracks

Gran Sasso



CERN

Fermilab
2017

Perché studiare ancora??

Non abbiamo ancora capito tutto!!!

- Conosciamo con precisione sufficiente le proprietà dei nucleoni? (massa, carica, vita media, spin, «dinamica interna»)?
- Proton spin puzzle
- «Missing resonances»: la teoria prevede l'esistenza di risonanze del nucleone non ancora osservate – dove sono??
- Non solo nucleoni: e gli stati del **charmonio** o gli **esotici** previsti dalla teoria e non ancora osservati??
- Perché ci sono 3 generazioni di particelle? Sono davvero 3?
- Qual è l'origine della massa delle particelle?
- I **neutrini** sono davvero privi di massa? O «oscillano»?
- Perché c'è **asimmetria materia – antimateria** nell'Universo?
- **Gravità** nel Modello Standard?
- Esistono evidenze di **nuova fisica** oltre il Modello Standard?



L'esperimento AEGIS

Antimatter Experiment: Gravity, Interferometry, Spectroscopy



Il principio di universalità di caduta libera (o *Weak Equivalence Principle, WEP*) stabilisce che tutti i corpi cadono con la stessa accelerazione.
Vale anche per l'antimateria?

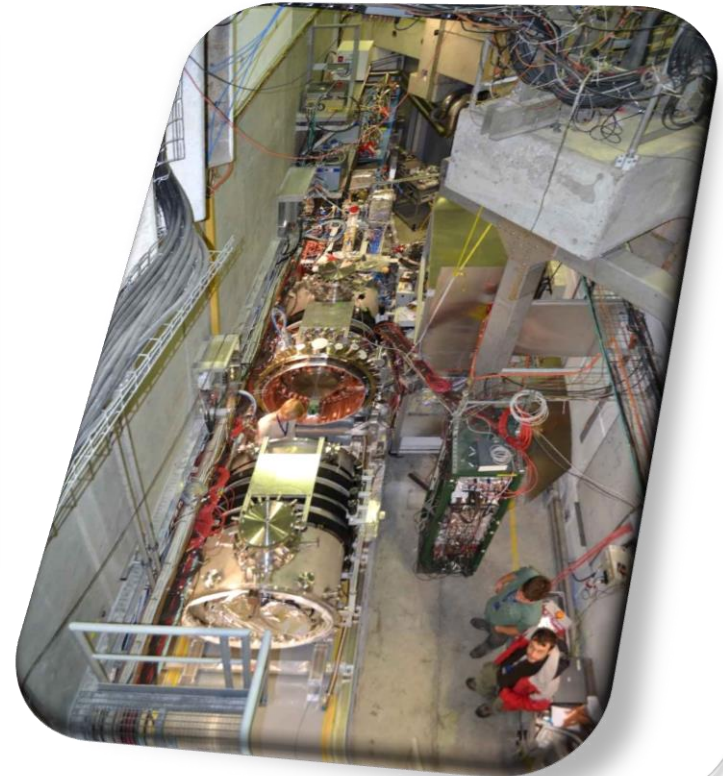
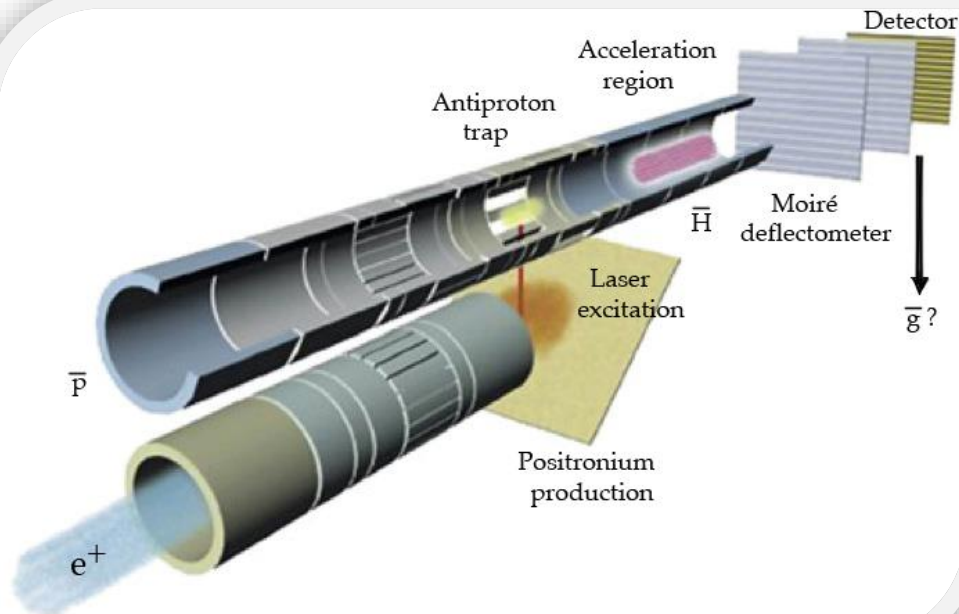
Goal di AEGIS:

verificare il WEP con gli antiprotoni forniti dal CERN, utilizzando il deceleratore di antiprotoni (AD), ed effettuare la **prima misura diretta dell'accelerazione gravitazionale terrestre con l'atomo di antiidrogeno**

(prodotto in grandi quantità da ATHENA nel 2002 e intrappolato da ALPHA nel 2012, è ora prodotto routinariamente al CERN)

L'esperimento AEGIS

Misura della **forza di gravità** una precisione dell'1% inviando un fascio di **antiidrogeno** orizzontalmente in un tubo a vuoto e misurando lo spostamento verticale causato dalla forza di gravità per mezzo di un deflettometro Moirè e di un rivelatore sensibile alla posizione di elevata risoluzione spaziale.



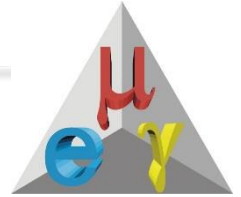
Perché studiare ancora??

Non abbiamo ancora capito tutto!!!

- Conosciamo con precisione sufficiente le proprietà dei nucleoni? (massa, carica, vita media, spin, «dinamica interna»)?
- Proton spin puzzle
- «Missing resonances»: la teoria prevede l'esistenza di risonanze del nucleone non ancora osservate – dove sono??
- Non solo nucleoni: e gli stati del **charmonio** o gli **esotici** previsti dalla teoria e non ancora osservati??
- Perché ci sono 3 generazioni di particelle? Sono davvero 3?
- Qual è l'origine della massa delle particelle?
- I **neutrini** sono davvero privi di massa? O «oscillano»?
- Perché c'è **asimmetria materia – antimateria** nell'Universo?
- **Gravità** nel Modello Standard?
- **Esistono evidenze di nuova fisica** oltre il Modello Standard?



L'esperimento MEG

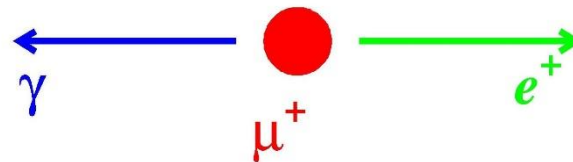


Mu to E Gamma



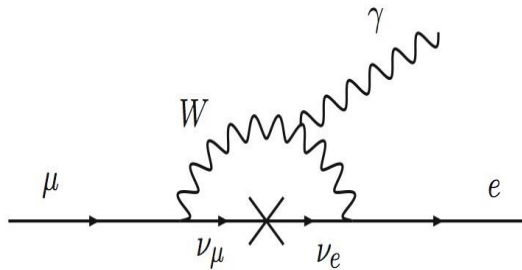
Paul Scherrer Institute (PSI)
@ Villigen, Svizzera

Goal di MEG:
Studiare il decadimento $\mu \rightarrow e\gamma$

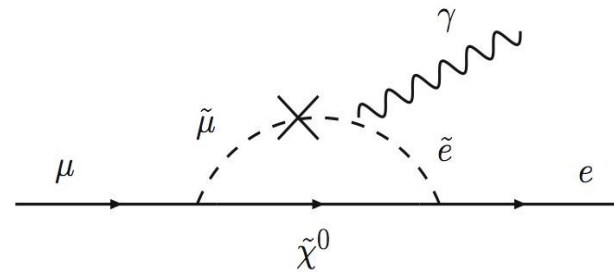


Ricerca di violazione del sapore leptonic (Lepton Flavour Violation, LPV) nel decadimento del muone in elettrone e fotone con una sensibilità nel rapporto di decadimento di 10^{-13}

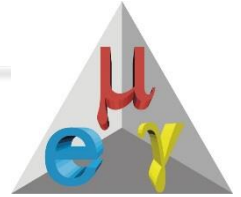
Modello Standard: $BR < 10^{-40}$



Teorie SUSY: $BR \sim 10^{-11} - 10^{-15}$



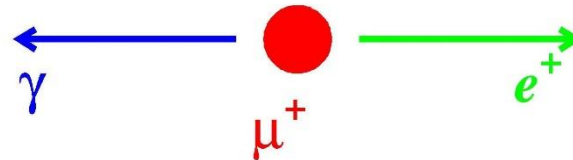
L'esperimento MEG



Mu to E Gamma

Paul Scherrer Institute (PSI)
@ Villigen, Svizzera

Goal di MEG:
Studiare il decadimento $\mu \rightarrow e\gamma$



Ricerca di violazione del sapore leptonic (Lepton Flavour Violation, LPV)
nel decadimento del muone in elettrone e fotone con una sensibilità nel
rapporto di decadimento di 10^{-13}

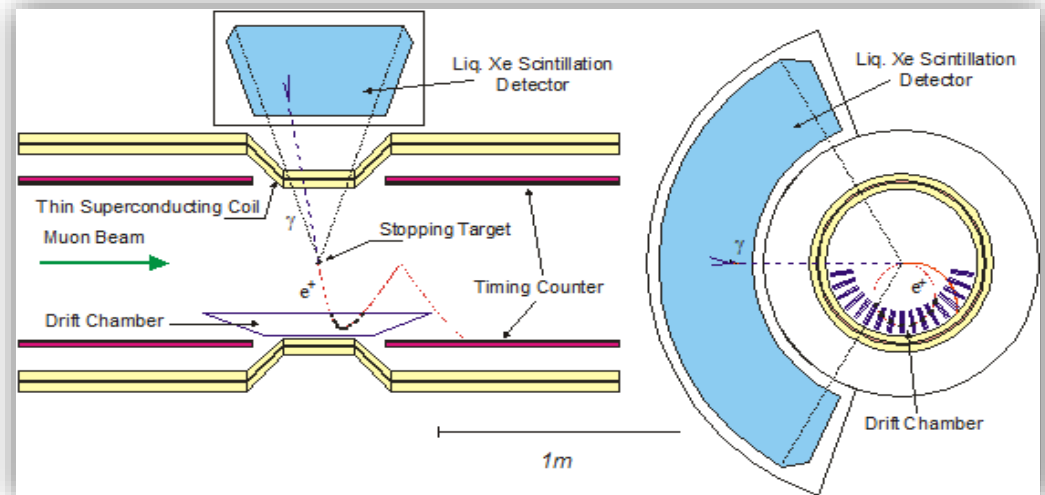
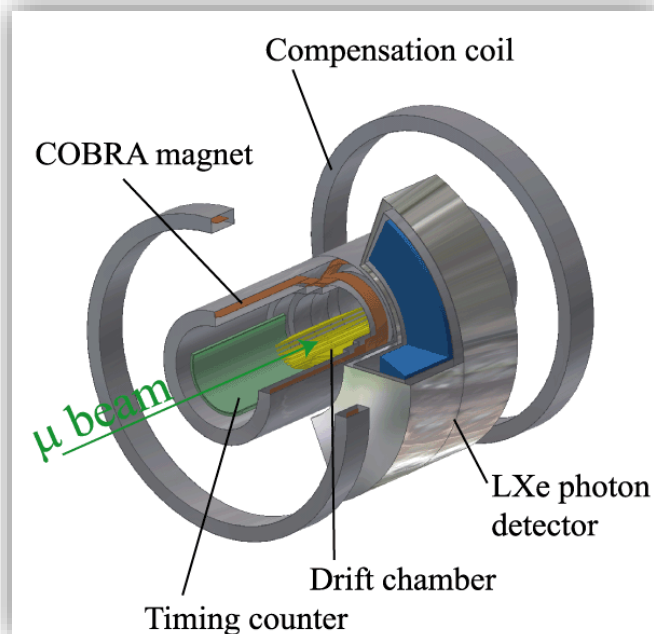
L'osservazione del decadimento $\mu \rightarrow e\gamma$ sarebbe segnale
incontrovertibile di nuova fisica e della necessità di superare il MS.
In caso di non osservazione, MEG migliorerà il limite superiore di 2
ordini di grandezza.

L'esperimento MEG

Segnale:

- $\theta_{e\gamma} = 180^\circ$
- $E_e = E_\gamma = 52.8 \text{ MeV}$
- $t_e = t_\gamma$

- Usa **fascio di muoni di alta intensità** e **decadimento del μ a riposo**;
- Misura **tempo, energia e angolo del γ** con **calorimetro e.m. ad alta risoluzione**;
- Misura **momento e^+** con **spettrometro ad alta risoluzione**;
- Misura **tempo e^+** con **fast counters (scintillator bars)**;
- Usa **sistema di trigger** basato sulla **coincidenza $e^+-\gamma$** .



Attività del gruppo di Pavia:

- **sviluppo, elettronica e software dei rivelatori timing counters (TC)**

MAMBO

A. Braghieri, S. Costanza, P. Pedroni
<http://wwwa2.kph.uni-mainz.de/>

PANDA

G. Boca, S. Costanza, P.
Montagna, A. Rotondi
<http://www-panda.gsi.de/>

ICARUS

A. Menegolli, C. Montanari,
G.L. Raselli
<http://icarus.lngs.infn.it/>

AEgis

A. Fontana, A. Rotondi
<http://aegis.web.cern.ch/aegis/>

MEG

G. Boca, P.W. Cattaneo
<https://meg.web.psi.ch/>



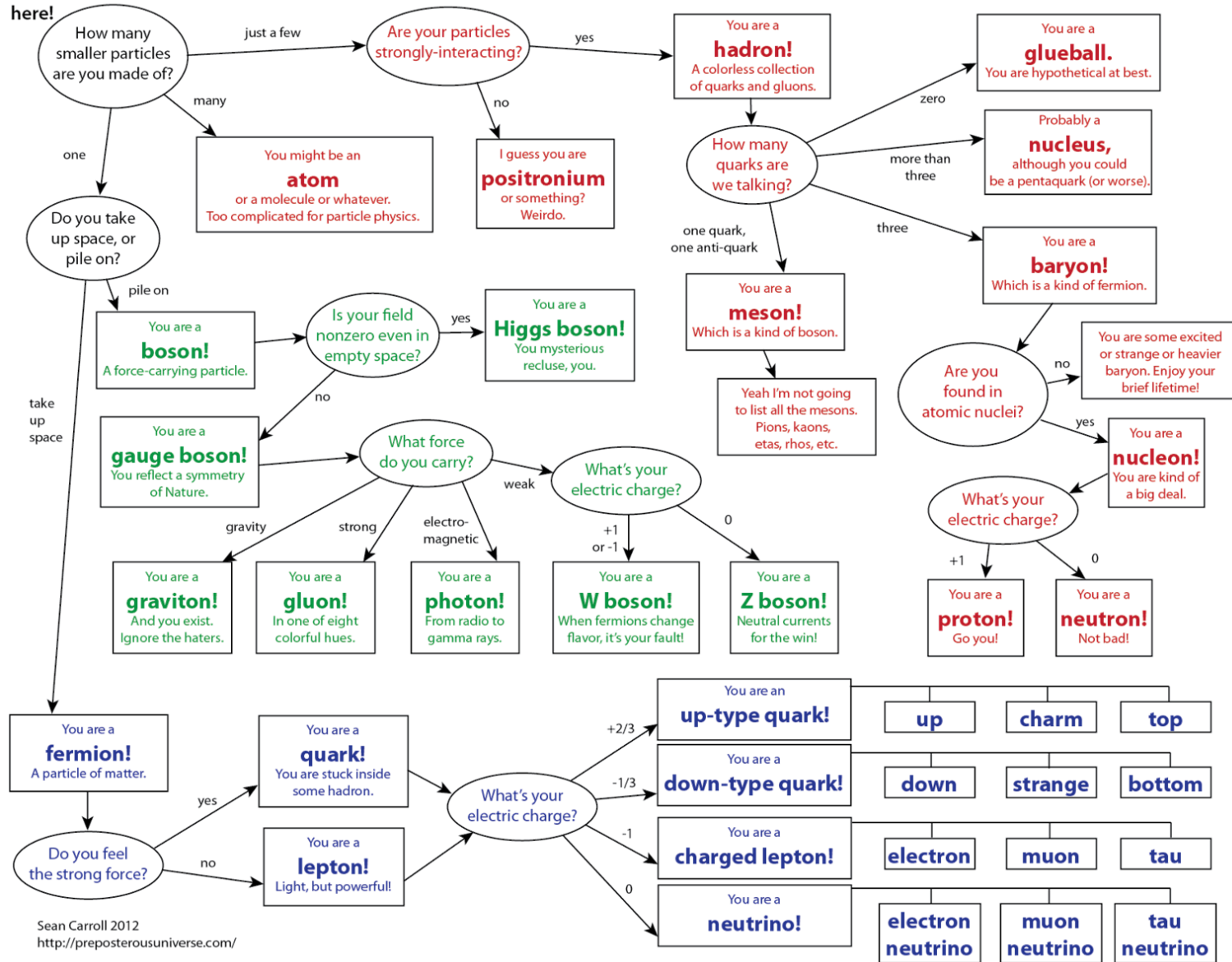
... + dottorandi, + laureandi...

What particle are you?

Color code:
 elementary fermions
 elementary bosons
 composite particles

Start here!

(Standard Model particles only! Dark matter and other exotica not welcome.)



Sean Carroll 2012
<http://preposterousuniverse.com/>